常用 39 种核素空气比释动能率常数计算

段嘉宇[1,2,3]，黄政林[1]，唐智辉[1]，方登富[1]，李志刚[1]，王弘昱[1]，韦应靖[1,4]

1（中国辐射防护研究院　太原 030006）

2（辐射安全与防护山西省重点实验室　太原 030006）

3（中核集团辐射防护技术重点实验室　太原 030006）

4（清华大学 核能与新能源技术研究院　北京 100084）

摘要　核素空气比释动能率常数 Γ_a 是评估剂量和屏蔽计算中非常重要的数据，Γ_a 的计算需要用到通量到空气比释动能率的转换系数 K_a/Φ 以及核素衰变光子信息。2020 年国际辐射与测量委员会 ICRU 发布了 95 号报告，该报告推荐了新的 K_a/Φ。为了验证基础数据更新后核素 Γ_a 数值的变化，基于理论和蒙特卡洛方法对医学、工业、农业中常用的 39 种核素空气比释动能率常数进行了计算，并对不同插值方法及阈值选取做了对比分析。得到以下结论：三次样条、对数-对数拉格朗日插值、线性-对数拉格朗日插值插值方法对 Γ_a 的计算影响较小；阈值选取对 Γ_a 的计算非常重要，部分核素在不同阈值情况下计算差异较大，推荐核医学剂量估算建议使用 10 keV 阈值，其他情况阈值选取 20 keV；理论计算和 MCNP 模拟计算差异较小，都可用于常数的计算。

关键词　空气比释动能率常数；空气比释动能；转换系数

The air kerma rate constants of 39 nuclides is commonly calculated

DUAN Jiayu[1,2,3]　HUANG Zhenlin[1]　TANG Zhihui[1]　FANG Dengfu[1]　LI Zhigang[1]　WANG Hongyu[1]　WEI Yingjing[1,4]

1(China Institute for Radiation Protection　Taiyuan 030006)

2(Shanxi Key Provincial Key Laboratory for Radiation Safety and Protection　Taiyuan 030006)

3(Key Laboratory of Radiation Protection Technology of CNNC　Taiyuan 030006)

4(Tsinghua University　Institute of Nnclear and New Energy Technology Beijing 100084)

Abstract:**[Background]**:The radionuclide air kerma rate constant (Γ_a). Γ_a is a very important data in dose evaluation and shielding calculation, which requires the conversion coefficient of flux to air Kerma(K_a/Φ) and the information of nuclide decay photon. In 2020, the International Commission on Radiation and Measurements (ICRU) released Report 95 (Operational Quantities for External Radiation Exposure), which recommended a new K_a/Φ .**[Purpose]**: In order to verify the change in nuclide values after the basic data was updated.**[Methods]**: Based on the theory and Monte Carlo method, the air specific kinetic energy rate constants of 39 kinds of nuclides commonly used in medicine, industry and agriculture were calculated, and different interpolation methods and threshold selection were compared and analyzed.**[Results and conclusions]**: The cubic splines, logarithmic-logarithmic Lagrangian interpolation, and linear-logarithmic Lagrangian interpolation interpolation methods have little influence on the calculation of Γ_a . The calculation of Γ_a threshold selection pairs is very important, and the calculation of some nuclides with different thresholds is quite different, and the recommended nuclear medicine dose estimation is recommended to use a threshold of 10 keV, and the threshold of other cases is 20 keV. The difference between theoretical calculation and MCNP simulation calculation is small, and both can be used for constants calculation.

Key words: Air Kerma rate constant; Air Kerma; Conversion coefficient

---

第一作者：段嘉宇，男，1995 年出生，2021 年于北京师范大学大学获硕士学位，研究领域为辐射计量学

收稿日期：20XX-00-00，修回日期：20XX-00-00

国际上最早在 1980 年发布的 ICRU 33（Radiation Quantities and Units）号报告[1]定义了空气比释动能 K_a，并在 ICRU 57（Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation）[2]中提出通量到空气比释动能率的转换系数 K_a/Φ。2020 年发布的 ICRU 95[3]对诸多转换系数进行了更新，其中包括 K_a/Φ。有以下两点改变：由 ICRU 57 中的 25 组数据增加到了 59 组数据，光子能量区间从 0.01 MeV~10 MeV 拓展到 0.002 MeV~50 MeV。K_a/Φ 是计算核素的 Γ_a 的主要参数之一，Γ_a 数值又是计算 K_a 极其重要的参数。K_a 计算在计量校准、医学治疗、工业探测、农业育种等领域有着广泛的应用。一般应用中，需要在国内外各种文献[4-12]和书籍[13]中查阅不同核素的 Γ_a 数值。但是经常会出现不同资料中 Γ_a 数值分歧较大的现象[4,8,9,12]。除上述 K_a/Φ 外，核素的基本衰变数据也是计算核素 Γ_a 的主要参数。ICRP 曾于 1983 年发布 38 号出版物(Radionuclide Transformations - Energy and Intensity of Emissions)[14]，给出了 820 种放射性核素较为全面的衰变数据，2007 年 ICRP107 号出版物(Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations)[15]取代 ICRP 38 号出版物的数据，并且开发出软件包 DECDATA 供研究人员使用，提供了 97 种元素的 1252 种放射性核素的衰变数据。同时，国际原子能机构（IAEA）官网对放射性核素衰变数据不断的进行着更新。

在 ICRU 95 号报告公布之前，研究人员也有对 Γ_a 值进行计算并发表[4~12]，但是大多计算都基于 CIRU 57 号报告中旧的转换系数和 ICRP 中相对较旧的衰变数据。Γ_a 值差异必然会对科研人员的防护计算、核医学放射治疗剂量计算等方面产生较大的影响，因此需要及时对核素的 Γ_a 值进行及时更新计算。通过理论计算方法和蒙卡方法计算了医学、工业、农业等应用中常用的 39 种核素的 Γ_a 值，并对计算结果进行了分析，为辐射剂量学领域提供更准确的 Γ_a 数值。

1 计算方法

1.1 K_a 计算公式

辐射源在空气中某点的比释动能率的大小，取决于光子能量、源的活度、源的距离及源的形状。K_a 的计算通常用到公式（1）。

$$K_a = A\frac{\Gamma_a}{r^2} \tag{1}$$

上式中，A 为源的活度，Γ_a 为点源的空气比释动能率常数，r 为源到计算点的距离。公式中给出的平方成反比是在将辐射源看作是各向同性点源，此外不考虑源的自屏蔽、散射和吸收。

1.2 Γ_a 计算公式

Γ_a 的计算如公式（2）所示。

$$\Gamma_\mathrm{a} = \frac{1}{4\pi}\sum_i p_i \cdot \left(K_a/\Phi\right)_i \tag{2}$$

其中 p_i 为能量为 E_i 的光子的分支比，K_a/Φ 为注量到 K_a 的转换系数。Γ_a 的单位为 $\mathrm{J\cdot m^2\cdot kg^{-1}}$，转换为 Gy 和 Bq 单位制，其单位为：$\mathrm{Gy\cdot m^2\cdot s^{-1}\cdot Bq^{-1}}$。

1.3 Γ_a 的理论计算

根据公式(2)计算核素 Γ_a 值，K_a/Φ 使用最新的 ICRU 95 中给出的数据，p_i 来自于 IAEA 官网的衰变数据。核素衰变的光子考虑全部 γ 射线光子、特征 X 射线光子、内转换光子以及轨道电子俘获的光子。文章分别使用对数-对数拉格朗日插值方法（DLI）[3]、线性-对数

拉格朗日插值（LLL）[4]和三次样条插值（CPI）[7]计算离散点能量对应的转换系数。同时为了研究阈值选取与核素 Γ_a 值的关系，计算了阈值分别为 10keV 和 20 keV 时的 Γ_a 值。

1.4 模拟计算方法

根据蒙特卡洛方法，使用 MCNP6 软件对核素的 Γ_a 值进行了模拟。为了理论模拟核素的 Γ_a 值，文章对无质量各向同性点源进行了建模，此方法是建立在理想情况下的，不考虑源的自屏蔽。在距源 100 cm 处放置一个半径为 1.5 cm 的小球。考虑光子和电子的联合输运，利用 F4 卡结合 de、df 卡模拟计算点源的空气比释动能率常数 Γ_a，其中 de、df 卡使用 ICRU 95 号报告中的 K_a/Φ 转换系数。

2 计算结果

不同阈值选取情况、不同基础数据来源以及不同插值方法所计算的核素 Γ_a 数值计算结果如表 1 所示，行 2、3、4 分别给出了计算所使用的基础数据来源、插值方法、阈值选择；列 3、4 分别为本次理论计算和模拟计算所得到的 Γ_a 数值；列 6、8 分别列出李士俊和 Ninkovic M M 的计算结果；列 10 是阈值为 20 keV 时的计算结果；列 12 和列 14 分别是 CPI 和 LLL 方法计算的结果；表中“—”表示文献中缺少对应核素 Γ_a 的数据；列 5、7、9、11、13、15 是百分比差异（C），C 按照公式（3）计算：

$$C = 2\left|\Gamma_{a1} - \Gamma_{a2}\right| / \left(\Gamma_{a1} + \Gamma_{a2}\right) \quad (3)$$

上式中，Γ_{a1} 和 Γ_{a2} 指的是同一个核素用不同方法或不同渠道获取的空气比释动能率常数。

表 1 39 种常用核素 Γ_a 值

Table.1 Γ_a Values of 39 common nuclides

核素	Γ_a 数据来源	理论计算（T）	模拟计算（M）	百分比差异（M 与 T）	李士俊[4]（L）	百分比差异（L 与 T）	Ninkovic M M[7]（N）	百分比差异（N 与 T）	理论计算（T1）	百分比差异 (T1 与 T)	理论计算（T2）	百分比差异 (T2 与 T)	理论计算（T3）	百分比差异 (T3 与 T)
	计算基础数据来源	ICRU95 IAEA	ICRU95 IAEA	—	ICRU57 ICRP 38	—	—	—	ICRU95 IAEA	—	ICRU95 IAEA	—	ICRU95 IAEA	—
	插值方法	DLI	DLI	—	LLL	—	CPI	—	DLI	—	CPI	—	LLL	—
	阈值	10keV	10keV	—	10keV	—	20keV	—	20keV	—	10keV	—	10keV	—
	单位	$Gy·m^2 Bq^{-1} s^{-1}$	$Gy·m^2 Bq^{-1} s^{-1}$	%	$Gy·m^2 Bq^{-1} s^{-1}$	%	$Gy·m^2 Bq^{-1} s^{-1}$	%	$Gy·m^2 Bq^{-1} s^{-1}$	%	$Gy·m^2 Bq^{-1} s^{-1}$	%	$Gy·m^2 Bq^{-1} s^{-1}$	%
Be-7		1.89E-18	1.89E-18	0.0	1.86E-18	1.6	—	—	1.89E-18	0.0	1.89E-18	0.0	1.89E-18	0.0
C-11		3.86E-17	3.86E-17	0.0	3.87E-17	0.3	3.87E-17	0.3	3.86E-17	0.0	3.86E-17	0.0	3.86E-17	0.0
N-13		3.86E-17	3.86E-17	0.0	3.87E-17	0.3	3.87E-17	0.3	3.86E-17	0.0	3.86E-17	0.0	3.86E-17	0.0
O-15		3.87E-17	3.86E-17	0.3	3.87E-17	0.0	3.87E-17	0.0	3.87E-17	0.0	3.87E-17	0.0	3.87E-17	0.0
F-18		3.74E-17	3.74E-17	0.0	3.87E-17	0.8	3.75E-17	0.3	3.74E-17	0.0	3.74E-17	0.0	3.74E-17	0.0
Na-24		1.20E-16	1.20E-16	0.0	1.20E-16	0.0	1.21E-16	0.8	1.20E-16	0.0	1.20E-16	0.0	1.20E-16	0.0
K-42		9.05E-18	9.04E-18	0.1	8.92E-18	1.4	9.10E-18	0.6	9.05E-18	0.0	9.05E-18	0.0	9.05E-18	0.0
K-43		3.62E-17	3.60E-17	0.5	3.63E-17	0.3	3.55E-17	2.0	3.62E-17	0.0	3.62E-17	0.0	3.62E-17	0.0
Cr-51		1.17E-18	1.17E-18	0.0	1.16E-18	0.9	1.17E-18	0.0	1.17E-18	0.0	1.17E-18	0.0	1.17E-18	0.0
Fe-52		5.88E-18	5.87E-18	0.2	2.72E-17	128.9	2.70E-18	74.1	5.88E-18	0.0	5.87E-18	0.2	5.88E-18	0.0
Fe-59		4.08E-17	4.07E-17	0.2	—	—	4.05E-17	0.7	4.08E-17	0.0	4.08E-17	0.0	4.08E-17	0.0
Co-57		6.18E-18	6.23E-18	0.8	6.24E-18	1.0	3.92E-18	44.8	3.70E-18	50.2	6.18E-18	0.0	6.18E-18	0.0
Co-58		3.59E-17	3.58E-17	0.3	3.58E-17	0.3	3.58E-17	0.3	3.59E-17	0.0	3.59E-17	0.0	3.59E-17	0.0
Co-60		8.49E-17	8.48E-17	0.1	8.50E-17	0.1	8.58E-17	1.1	8.49E-17	0.0	8.49E-17	0.0	8.49E-17	0.0

核素	Γ_a 数据来源	理论计算（T）	模拟计算（M）	百分比差异（M 与 T）	李士俊[4]（L）	百分比差异（L 与 T）	Ninkovic M M [7]（N）	百分比差异（N 与 T）	理论计算（T1）	百分比差异(T1 与 T)	理论计算（T2）	百分比差异(T2 与 T)	理论计算（T3）	百分比差异(T3 与 T)
	计算基础数据来源	ICRU95 IAEA	ICRU95 IAEA	—	ICRU57 ICRP 38	—	—	—	ICRU95 IAEA	—	ICRU95 IAEA	—	ICRU95 IAEA	—
	插值方法	DLI	DLI	—	LLL	—	CPI	—	DLI	—	CPI	—	LLL	—
	阈值	10keV	10keV	—	10keV	—	20keV	—	20keV	—	10keV	—	10keV	—
	单位	$Gy \cdot m^2 Bq^{-1} s^{-1}$	$Gy \cdot m^2 Bq^{-1} s^{-1}$	%	$Gy \cdot m^2 Bq^{-1} s^{-1}$	%	$Gy \cdot m^2 Bq^{-1} s^{-1}$	%	$Gy \cdot m^2 Bq^{-1} s^{-1}$	%	$Gy \cdot m^2 Bq^{-1} s^{-1}$	%	$Gy \cdot m^2 Bq^{-1} s^{-1}$	%
Ga-67		5.24E-18	5.20E-18	0.8	5.22E-18	0.4	5.40E-18	3.0	5.24E-18	0.0	5.24E-18	0.0	5.24E-18	0.0
Ga-68		3.58E-17	3.57E-17	0.3	3.58E-17	0.0	3.58E-17	0.0	3.58E-17	0.0	3.58E-17	0.0	3.58E-17	0.0
Se-75		4.53E-17	4.55E-17	0.4	4.17E-17	8.3	1.34E-17	108.7	1.34E-17	108.7	4.53E-17	0.0	4.53E-17	0.0
Kr-85		8.51E-20	8.50E-20	0.1	8.37E-20	1.7	—	—	8.44E-20	0.8	8.51E-20	0.0	8.51E-20	0.0
Mo-99		5.83E-18	5.82E-18	0.2	6.00E-18	2.9	5.49E-18	6.0	5.39E-18	7.8	5.83E-18	0.0	5.83E-18	0.0
Tc-99m		5.23E-18	5.24E-18	0.2	5.03E-18	3.9	—	—	4.23E-18	21.1	5.23E-18	0.0	5.23E-18	0.0
In-111		2.22E-17	2.24E-17	0.9	2.12E-17	4.6	2.30E-17	3.5	2.22E-17	0.0	2.22E-17	0.0	2.22E-17	0.0
I-123		1.14E-17	1.16E-17	1.7	1.07E-17	6.3	1.00E-17	13.1	1.14E-17	0.0	1.14E-17	0.0	1.14E-17	0.0
I-124		4.34E-17	4.37E-17	0.7	4.13E-17	5.0	—	—	4.34E-17	0.0	4.34E-17	0.0	4.34E-17	0.0
I-125		1.08E-17	1.11E-17	2.7	9.79E-18	9.8	1.05E-17	2.8	1.08E-17	0.0	1.08E-17	0.0	1.08E-17	0.0
I-129		4.69E-18	4.73E-18	0.8	4.30E-18	8.7	—	—	4.69E-18	0.0	4.69E-18	0.0	4.69E-18	0.0
I-131		1.45E-17	1.45E-17	0.0	1.44E-17	0.7	1.45E-17	0.0	1.45E-17	0.0	1.45E-17	0.0	1.45E-17	0.0
Xe-127		1.51E-17	1.53E-17	1.3	1.43E-17	5.4	1.42E-17	6.1	1.51E-17	0.0	1.51E-17	0.0	1.51E-17	0.0
Xe-133		3.79E-18	3.89E-18	2.6	3.52E-18	7.4	3.98E-18	4.9	3.79E-18	0.0	3.79E-18	0.0	3.79E-18	0.0
Cs-137		2.15E-17	2.15E-17	0.0	2.13E-17	0.9	2.28E-17	5.9	2.15E-17	0.0	2.15E-17	0.0	2.15E-17	0.0
Eu-152		2.65E-17	2.63E-17	0.8	4.13E-17	43.7	4.14E-17	43.9	2.65E-17	0.0	2.65E-17	0.0	2.65E-17	0.0

核素	Γ_a 数据来源	理论计算（T）	模拟计算（M）	百分比差异（M 与 T）	李士俊[4]（L）	百分比差异（L 与 T）	Ninkovic M M[7]（N）	百分比差异（N 与 T）	理论计算（T1）	百分比差异(T1 与 T)	理论计算（T2）	百分比差异(T2 与 T)	理论计算（T3）	百分比差异(T3 与 T)
	计算基础数据来源	ICRU95 IAEA	ICRU95 IAEA	—	ICRU57 ICRP 38	—	—	—	ICRU95 IAEA	—	ICRU95 IAEA	—	ICRU95 IAEA	—
	插值方法	DLI	DLI	—	LLL	—	CPI	—	DLI	—	CPI	—	LLL	—
	阈值	10keV	10keV	—	10keV	—	20keV	—	20keV	—	10keV	—	10keV	—
	单位	$Gy \cdot m^2 Bq^{-1} s^{-1}$	$Gy \cdot m^2 Bq^{-1} s^{-1}$	%	$Gy \cdot m^2 Bq^{-1} s^{-1}$	%	$Gy \cdot m^2 Bq^{-1} s^{-1}$	%	$Gy \cdot m^2 Bq^{-1} s^{-1}$	%	$Gy \cdot m^2 Bq^{-1} s^{-1}$	%	$Gy \cdot m^2 Bq^{-1} s^{-1}$	%
Eu-154		4.49E-17	4.44E-17	1.1	4.31E-17	4.1	4.42E-17	1.6	4.49E-17	0.0	4.49E-17	0.0	4.49E-17	0.0
Sm-153		3.24E-18	3.28E-18	1.2	3.02E-18	7.0	—	—	3.24E-18	0.0	3.24E-18	0.0	3.24E-18	0.0
Tm-170		1.62E-19	1.63E-19	0.6	1.96E-19	19.0	1.54E-19	5.1	1.62E-19	0.0	1.62E-19	0.0	1.62E-19	0.0
Ta-182		4.50E-17	4.53E-17	0.7	4.43E-17	1.6	4.46E-17	0.9	4.50E-17	0.0	4.50E-17	0.0	4.50E-17	0.0
Ir-192		3.11E-17	3.12E-17	0.3	3.02E-17	2.9	3.03E-17	2.6	2.93E-17	6.0	3.11E-17	0.0	3.11E-17	0.0
Au-198		1.57E-17	1.57E-17	0.0	1.52E-17	3.2	1.52E-17	3.2	1.57E-17	0.0	1.57E-17	0.0	1.57E-17	0.0
Hg-197		2.39E-17	2.41E-17	0.8	1.35E-17	55.6	3.16E-17	27.7	2.58E-18	161.0	2.39E-17	0.0	2.39E-17	0.0
Pu-238		2.02E-18	2.03E-18	0.5	2.63E-18	26.2	—	—	1.46E-21	199.7	2.02E-18	0.0	2.02E-18	0.0
Am-241		7.85E-18	7.84E-18	0.1	1.55E-18	65.5	1.10E-18	150.8	7.85E-18	0.0	7.85E-18	0.0	7.85E-18	0.0

3 结果分析

理论计算同李士俊计算的 Γ_a 数值相比，有 26 个核素数值百分比差异在 5 %以内，7 个核素偏差在 5 % ~ 10 %之间；有 5 个核素偏差大于 10 %，分别是 Fe-52、Tm-170、Eu-152、Pu-238、Am-241；同 Ninkovic M M 计算的 Γ_a 数值比较，有 22 个核素数值百分比差异在 5 %以内，有 3 个核素偏差在 5 % ~ 10 %之间，有 7 个核素偏差大于 10 %，分别是 Fe-52、Co-57、Se-75、I-123、Eu-152、Hg-197、Am-241。

产生差异的原因的可能性有：基础衰变数据、转换系数选择的不同；插值方法的不同；阈值选取的不同。根据公式（2）可以知道，基础衰变数据、转换系数的不断更新必然会影响 Γ_a 的计算，因此下文仅分析了插值方法和光子能量阈值不同对 Γ_a 计算的影响。此外，对理论计算和模拟计算结果做了对比。

3.1 插值方法的不同

目前，国内外在计算 Γ_a 的值的过程中，使用的插值方法主要有 DLI、LLI、CPI。使用不同的插值方法、相同的衰变数据和光子阈值计算了以上 39 种核素的 Γ_a 。结果如表 1 所示，保留一位小数的情况下，LLI 与 DLI 的百分比差异约为 0，CPI 与 DLI 结果一致。表明不同插值方法对 Γ_a 的计算影响较小。

3.2 阈值的不同

使用 DLI 计算方法，能量阈值为 10 keV、20 keV 计算的 Γ_a 值进行了比较，结果如表 1 中所示。核素 Co-57、Se-75、Tc-99m、Hg-197、Pu-238 的百分比差异大于 10 %。通过对比衰变数据可以发现在这些核素衰变发射的光子中，Co-57 有发射 14.4 keV 的光子，计算 Γ_a 所占的比重分别为 40 %；Se-75 有发射 10.5 keV、11.8 keV、11.9 keV、14.9 keV 的光子，计算比重为 71 %；Tc-99m 有发射 18.3 keV、18.4 keV 的光子，计算比重为 19 %；Hg-197 有发射 11.4 keV 的光子，计算比重为 89% ；Pu-238 有发射 16.7 keV 的光子，计算比重为 99 %。

对比其他核素的衰变数据，可以发现同样存在 10 keV ~ 20 keV 的光子，但是其他核素发射的 10 keV ~ 20 keV 对其 Γ_a 计算贡献较小，所以不同阈值的 Γ_a 计算值差异较小。对于部分核素，有必要对能量阈值做出科学选择。根据 Ninkovic M M[7]所提，在一般的保健物理学中，20 keV 以下的光子不考虑，而在核医学中 10 keV ~ 20 keV 的光子需要考虑，因为这部分光子在近距离时剂量贡献较大。因此计算核素的 Γ_a 值必须根据使用场景来考虑其数值计算的阈值，在核医学中估算剂量使用的 Γ_a 的计算阈值需为 10 keV，其他工业或者农业应用中使用 20 keV 的阈值。

3.3 理论模拟

理论模拟结果和理论计算结果的百分比差异都较小，33 个核素差异小于 1 %，6 个核素差异区间在 1 % ~ 3 %，这种微小的差异如果在剂量估算中，可用于医学、工业和农业中的剂量学常数计算。

4 结语

文章对 39 种常用放射性核素的 Γ_a 值进行了更新计算，计算基于 ICRU 95 号报告的转换系数和 IAEA 官网最新的衰变数据。结果表明： Γ_a 的计算数值依赖于研究人员对核素衰变数据的进一步测量，基础衰变数据的变化直接影响 Γ_a 数值的计算，常数的计算需要与时俱进；10 keV~20 keV 能量段的光子对 Γ_a 数值贡献较大，阈值的选取必须引起研究人员的注意，建议在核医学剂量估计中选用 10 keV 的阈值，其他工业农业中选用 20 keV 的阈值；理论计算 Γ_a 数值或 MCNP6 模拟计算的 Γ_a 数值差异较小，文中计算的 Γ_a 数值更接近于实际值，可用于病人、核领域工作人员以及工作辐射剂量的精确计算。

参考文献

[1] International Commission on Radiation Units and Measurements.Radiation Quantities and Units.ICRU Reports 33.U.S.A,Maryland,Bethesda:ICRU, 1980.

[2] International Commission on Radiation Units and Measurements.Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRU Reports 57.U.S.A,Maryland,Bethesda:1998.

[3] International Commission on Radiation Units and Measurements.Operational Quantities for External Radiation Exposure.Reports 95.U.S.A,Maryland,Bethesda:2019.

[4] 李士骏.发射光子的放射性核素各向同性点源的剂量学常数[J].辐射防护,1999(04):7-23.

[5] 时磊.一些γ放射性核素空气比释动能率常数的MCNP计算[J].海峡科学,2016(06):21+24.

[6] Ninkovć M M. The air kerma-rate constant of ^{226}Ra in equilibrium with its decay products[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1987, 255(1-2): 334-337.

[7] Ninkovic M M, Adrovic F. Air kerma rate constants for nuclides important to gamma ray dosimetry and practical application[J]. Gamma radiation, 2012: 1-16.

[8] Ninkovic M M, Raicevic J J, Adrovic F. Air kerma rate constants for gamma emitters used most often in practice[J]. Radiation protection dosimetry, 2005, 115(1-4): 247-250.

[9] Ninkovic M M, Raicevic J J. The air-kerma rate constant of 192Ir[J]. Health physics, 1993, 64(1): 79-81.

[10]Currier B H, Munro III J J, Medich D C. Selection of an Appropriate Air Kerma Rate Constant for 75Se Sources[J]. Health Physics, 2013, 104(5): 511-516.

[11]Nguyen J, Gräfe J L. Investigating the air kerma rate constant for 241Am through first principle calculations and simulation[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2021, 168: 109482.

[12]Wasserman H, Groenewald W. Air kerma rate constants for radionuclides[J]. European Journal of Nuclear Medicine, 1988, 14: 569-571.

[13]中国计量测试学会,电离辐射专业委员会.辐射剂量学常用数据[M].北京：中国计量出版社,1987.

[14]ICRP,Radionuclide Transformations: Energy and Intensity ofEmissions, ICRP Publication 38, (1983).

[15]Eckerman K, Endo A. ICRP Publication 107. Nuclear decay data for dosimetric calculations[J]. Annals of the ICRP, 2008, 38(3): 7-96.